

УДК 669.7:624.01

## ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

*чл.-кор. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф. Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО;  
канд. техн. наук, доц. О.В. ШУМОВ  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

*Рассмотрены подходы к повышению коррозионной стойкости сварных соединений конструкций из деформируемых алюминиевых сплавов, в частности к повышению их сопротивления коррозии под напряжением. Особенности коррозии под напряжением исследовали для образцов стыковых сварных соединений, полученных дуговой сваркой в среде аргона. Предложено повысить сопротивление коррозии под напряжением за счет использования твердого диоксида углерода для принудительного охлаждения металла, а также подбора оптимальных режимов последующей термической обработки соединяемых элементов. Определены величины сопротивления коррозии сварных соединений, полученных дуговой сваркой в среде аргона как в обычных условиях, так и с использованием твердого диоксида углерода, а также зависимости прочности сварных соединений от режимов отпуска, по которым найдены оптимальные режимы термической обработки для обеспечения высокого сопротивления коррозии.*

**Ключевые слова:** *алюминиевые сплавы, сварные соединения, сопротивление коррозии, диоксид углерода, термическая обработка.*

**Введение.** Деформируемые алюминиевые сплавы широко применяются при производстве сварных конструкций и их элементов, испытывающих небольшие нагрузки и требующие высокого сопротивления коррозии. К данным материалам относятся, например, сплавы системы «алюминий – магний», которые обладают высокой пластичностью, хорошей свариваемостью, высокой коррозионной стойкостью. Требуемые физико-механические и эксплуатационные свойства таких сплавов обеспечиваются за счет легирования твердого раствора или за счет пластической деформации. Эти сплавы применяются, например, для изготовления емкостей, трубопроводов, дверей, перегородок и т.п. [1; 2].

Одним из характерных типов повреждений сварных соединений в таких конструкциях является коррозия. Кроме того, при эксплуатации в данных конструкциях действуют значительные напряжения, которые возникают как вследствие технологии производства, так и от действия рабочей среды и различных нагрузок (гравитационных, ветровых). Суммарное влияние нагрузок и разрушающих воздействий, таких как коррозионная среда, растягивающие напряжения и др., обуславливают наибольшую значимость коррозионно-механического механизма при разрушении конструкций данного типа.

Исследования показывают, что алюминиевые сплавы в области сварных соединений обычно имеют меньшую коррозионную стойкость и меньшую прочность по сравнению с основным металлом [3]. По этой причине повышение физико-механических и эксплуатационных свойств сварных соединений выступает в качестве одного из резервов повышения надежности и увеличения сроков службы конструкций из алюминиевых сплавов.

Ухудшение свойств алюминиевых сплавов в области сварных соединений, получаемых дуговой сваркой, связаны с процессами, протекающими в сплавах под действием высоких температур, окружающей среды, приложенного к соединяемым деталям давления и т.п. В результате воздействия высоких температур при дуговой сварке происходят значительные изменения структуры и свойств алюминиевых сплавов, во многом обуславливающие в дальнейшем характер разрушения деталей из них. К таким изменениям следует отнести возникновение дефектов и остаточных напряжений в области сварного соединения, изменение химического состава и структуры сварного шва, локализацию легкоплавких эвтектик и хрупких фаз по границам зерен сплава, образование пересыщенного твердого раствора легирующего элемента в основном металле, перераспределение вакансий и примесей сплава и т.д. [4].

При высокотемпературном нагреве от действия сварочной дуги происходит ухудшение ряда физико-механических и эксплуатационных свойств алюминиевых сплавов. В частности, ухудшение проявляется в том, что прочностные свойства материалов (временное сопротивление и предел текучести) сварных соединений из алюминиевых сплавов при дуговой сварке в среде аргона без последующей термической обработки составляют у тонколистовых заготовок около 70...75% от показателей прочности основного металла. При этом установлено, что прочностные характеристики сварных соединений из алюминиевых сплавов возможно увеличить на 10...15% за счет термической обработки, выполняемой после процесса сварки [5].

В данной работе ставилась задача повысить коррозионную стойкость, в частности сопротивление коррозии под напряжением, получаемых дуговой сваркой сварных соединений из деформируемых алюминиевых сплавов.

**Методика эксперимента.** Образцы сварных соединений получали дуговой сваркой встык заготовок из деформируемого алюминиевого сплава АМг6 толщиной 4 мм с использованием присадочной проволоки диаметром 3 мм из того же сплава. Сварка осуществлялась вольфрамовым электродом диаметром 3 мм на переменном токе в среде аргона. Показатели прочности сварных соединений определяли в соответствии с требованиями ГОСТ 6996. В результате испытаний установлена величина временного сопротивления  $\sigma_B$ . Для испытаний на прочность использовали стандартные плоские образцы с ослабленным сечением в области сварного шва. Образцы были вырезаны в соответствии с размерами образца типа XXIV из сваренных встык пластин из алюминиевого сплава; выпуклость сварного шва на образцах удалялась до основного металла.

Исследование коррозионной стойкости сварных соединений из алюминиевых сплавов проводилось в соответствии с требованиями ГОСТ 9.019. Образцы сварных соединений испытывались с использованием метода заданной одноосной растягивающей нагрузки, которая создавала в исследуемых образцах напряжение  $0,9 \cdot \sigma_{0,2}$ . В процессе испытаний образцы были постоянно погружены в раствор 3%-ного раствора хлорида натрия при температуре 20 °С. Смена раствора производилась каждые 15 суток.

**Основная часть.** На значения сопротивления коррозии под напряжением сварных соединений в значительной степени оказывают влияние изменения коррозионных и прочностных свойств алюминиевых сплавов при дуговой сварке. Для повышения надежности работы конструкции в условиях коррозионно-напряженного состояния осуществляются различные мероприятия, которые обеспечивают образование благоприятных сжимающих напряжений, уменьшение концентрации напряжений, снижение остаточных растягивающих напряжений, предупреждение возникновения химической неоднородности и образования дефектов в сварных швах и т.д. [6].

Существенный вклад в снижение сопротивления коррозии сварных соединений вносят растягивающие напряжения, возникающие в деталях при сварке. Одним из эффективных методов уменьшения напряжений в соединяемых деталях при дуговой сварке служит принудительное охлаждение высокотемпературной области сварного шва [7]. Помимо уменьшения остаточных напряжений использование принудительного охлаждения позволяет также уменьшить площадь перегретого металла, время нахождения свариваемого металла при повышенных температурах. Так как степень химической неоднородности металла сварного шва, выгорание легирующих элементов в значительной степени зависят от температуры и продолжительности нагрева, то выполнение дуговой сварки с принудительным охлаждением позволяет также уменьшить количество указанных негативных последствий дуговой сварки, вызывающих снижение коррозионных и прочностных характеристик металла.

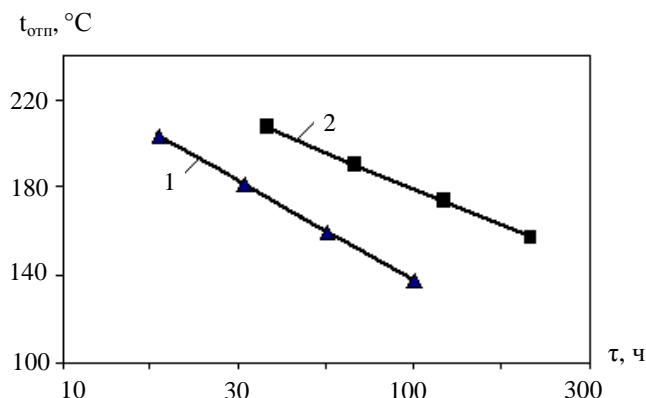
Однако производство дуговой сварки с принудительным охлаждением требует использования дополнительной технологической оснастки для подачи охлаждающей среды в зону сварки, а также вызывает сложности при удалении охлаждающей среды, используя традиционные сварочные материалы. В результате выполнение сварки с охлаждением усложняет производство работ, снижает производительность труда, повышает себестоимость производства, ограничивает технические возможности процесса сварки, ухудшает условия работы сварщика и т.д.

Значительную часть указанных проблем дуговой сварки с охлаждением возможно устранить при использовании для охлаждения соединяемых деталей новых сварочных материалов, в частности твердого диоксида углерода [8]. Эффективность использования данного материала в качестве охладителя связана с его свойствами: высокой охлаждающей способностью, постоянной низкой температурой, способностью переходить из твердого состояния в газообразное состояние без образования жидкой фазы. Исследования показали, что при использовании твердого диоксида углерода в процессе дуговой сварки также обеспечивается стабильное, мягкое горение дуги, снижается разбрызгивание свариваемого металла, устраняется чешуйчатость сварного шва.

В работе исследовалось влияние режимов охлаждения в процессе дуговой сварки, а также режимов последующей термической обработки на сопротивление коррозии под напряжением сварных соединений из алюминиевого сплава марки АМг6. Сварные соединения получали дуговой сваркой в среде аргона при различных условиях охлаждения высокотемпературной области сварного шва. При этом были использованы два варианта охлаждения: охлаждение на воздухе; охлаждение при помощи твердого диоксида углерода. Готовые сварные соединения подвергались термической обработке – отпуску на различных режимах.

Выявлено, что на физико-механические и эксплуатационные свойства сварных соединений, в том числе на коррозионную стойкость, влияют такие параметры структуры, как количество, форма и расположение фаз алюминиевых сплавов [9; 10]. Данными параметрами структуры алюминиевых сплавов в значительной степени возможно управлять за счет изменения параметров термического цикла при сварке изделий и режимов термической обработки, добиваясь тем самым требуемого сочетания свойств сварных конструкций. Чтобы установить режимы термической обработки, обеспечивающие получение высоких значений сопротивления коррозии под напряжением, определены зависимости предела прочно-

сти образцов от температуры и продолжительности отпуска сварных соединений, представленных на рисунке. Графики зависимости строились по характерным точкам изменения прочности, полученным в результате исследований влияния режимов термической обработки на механические свойства алюминиевых сплавов. С помощью этих зависимостей определены параметры термической обработки сварных соединений, обеспечивающих получение повышенных значений пределов текучести и прочности при испытаниях на растяжение.



Диаграммы изменения прочности сварных соединений из алюминиевого сплава с принудительным охлаждением (1); с охлаждением на воздухе (2)

( $t_{отп}$  – температура отпуска, °C;  $\tau$  – длительность отпуска, ч)

Значения сопротивления коррозии под напряжением сварных соединений, полученных при различных режимах термической обработки, приведены в таблице 1.

Сопротивление коррозии под напряжением сварных соединений, сут

Вид охлаждения	Режимы термической обработки		
	Охлаждение на воздухе	15	19
Охлаждение принудительное	18	21	19

Из приведенных в таблице данных можно заключить, что сварные соединения из деформируемого алюминиевого сплава, полученные дуговой сваркой в среде аргона с использованием для охлаждения твердого диоксида углерода, имеют стойкость к коррозии под напряжением в среднем на 14% большую, чем сварные соединения, полученные аргоно-дуговой сваркой без охлаждения.

Данное повышение сопротивления коррозии под напряжением сварных соединений возможно объяснить следующими причинами. *Во-первых*, при использовании твердого диоксида углерода обеспечивается уменьшение площади перегретого металла и длительности пребывания его при высоких температурах, за счет чего снижается выгорание легирующих элементов сварного шва, в частности магния и титана, и снижается ухудшение эксплуатационных и физико-механических свойств металла в процессе дуговой сварки. *Во-вторых*, благодаря высокой охлаждающей способности твердого диоксида углерода, по сравнению с воздухом, достигается высокая скорость охлаждения металла в зоне сварного шва. За счет этого после сварки достигается измельчение структуры металла сварного шва, что вызывает увеличение влияния термической обработки на параметры прочности и коррозионной стойкости сварного соединения. *В-третьих*, благодаря расположению твердого диоксида углерода в процессе сварки непосредственно в области сварного шва, достигается сокращение времени переноса изделия от закалки в охлаждающую среду до минимального значения. Сокращение времени переноса также обеспечивает получение более высокой скорости охлаждения сварного соединения после сварки и увеличение эффекта от термической обработки.

**Заключение.** В результате проведенного исследования изучено влияние условий охлаждения при дуговой сварке в среде аргона и режимов последующей термической обработки на сопротивление коррозии под напряжением сварных соединений из деформируемых алюминиевых сплавов. Установлено, что использование твердого диоксида углерода при дуговой сварке обеспечивает увеличение сопротивления коррозии под напряжением сварных соединений из деформируемых алюминиевых сплавов на 14% по сравнению со сварными соединениями, полученными обычной дуговой сваркой в среде аргона.

Данное изменение коррозионной стойкости сварных соединений можно объяснить:

1) меньшей потерей легирующих элементов металлом сварного шва за счет уменьшения продолжительности и площади нагрева металла до высоких температур в результате охлаждения твердым диоксидом углерода, подаваемым в область сварки;

2) большей скоростью охлаждения металла сварного шва за счет более высокой охлаждающей способности твердого диоксида углерода по сравнению с воздухом и сокращением времени переноса детали от закалки в охлаждающую среду до минимального значения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением ; под ред. Б.Е. Патона. – М. : Машиностроение, 1974. – 768 с.
2. Parmar, K.S. Welding engineering and Technology / K.S. Parmar. – Khanna Publishers, 2005. – 270 p.
3. Фридляндер, И.Н. Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы / И.Н. Фридляндер. – М. : Metallurgia, 1978. – 208 с.
4. Мондольфо, Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов / Л.Ф. Мондольфо. – М. : Metallurgia, 1979. – 640 с.
5. Металловедение алюминия и его сплавов / А.И. Беляев [и др.]. – М. : Metallurgia, 1983. – 280 с.
6. Куликов, В.П. Технология сварки плавлением / В.П. Куликов. – Минск : Дизайн ПРО, 2001. – 256 с.
7. Feng, Z. Processes and Mechanisms of Welding Residual Stress and Distortion / Z. Feng. – Woodhead Publishers, 2005. – 343 p.
8. Пантелеенко, Ф.И. Снижение поверхностных деформаций путем термической обработки в процессе стыковой сварки / Ф.И. Пантелеенко, А. Хейдари Монфаред // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2011. – № 3. – С. 19–26.
9. Герчикова, Н.С. Тонкая структура и коррозионное растрескивание алюминиевых сплавов / Н.С. Герчикова. – М. : Metallurgia, 1982. – 160 с.
10. Кимкина, С.И. Сопротивление разрушению алюминиевых сплавов / С.И. Кимкина. – М. : Metallurgia, 1981. – 280 с.

Поступила 15.12.2017

#### INCREASING RESISTANCE OF WELDING JOINTS OF ALUMINUM ALLOYS

*F. PANTELEENKO, A. SHUMAV*

*Some approaches to increase the resistance to corrosion of welding joints of wrought aluminum alloys, for example the resistance to stress corrosion have been considered. It has been researched the resistance to corrosion of butt welding joints obtained by argon shielded welding. It has been proposed to increase the resistance to stress corrosion by using the hard carbon dioxide for forced cooling of metal and fitting the subsequent heat treatment conditions. It has been established the values of resistance to stress corrosion of welding joints obtained as usual conditions as with the use of hard carbon dioxide. It was evaluated the functional connections between tempering conditions and strength of welding joints, that permitted to define the optimal heat treatment conditions to reach the high resistance to stress corrosion.*

**Keywords:** *aluminum alloys, welding joints, resistance to corrosion, carbon dioxide, heat treatment.*